

論文 電気防食機能を付与した炭素繊維シート補強に関する研究

山本 貴士^{*1}・中村 亮太^{*2}・小澤 一宏^{*3}・伊藤 秀治^{*4}

要旨: 本研究では,電気防食機能を付与した炭素繊維シート補強工法の確立を目的として,導電性樹脂を用いた陽極システムの導電性および機械的性質を検討した。また,本陽極システムを適用した RC 曲げ部材中の鉄筋について,通電および防食特性を検討するとともに,曲げ補強への適用性を,補強直後と防食電流通電後の供試体に対する曲げ載荷試験をもとに検討した。炭素繊維シート陽極システムによる,RC 部材中の鉄筋への通電および曲げ補強が可能であることを確認した。また,曲げ補強部材の耐荷特性に与える通電処理の影響は見られなかった。

キーワード: 炭素繊維シート, 導電性樹脂, 電気防食, 曲げ補強

1. はじめに

近年,電気化学的防食工法が,鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化に対する補修工法として注目されている。このうち電気防食工法は,鉄筋の腐食進行抑制に有効であるが,耐荷性能の向上は期待されていない。一方,耐荷性能の向上を期待する補強工法として,炭素繊維シートを用いた補強が注目されている。この工法では,炭素繊維シート貼付けによって,外部からの劣化因子の侵入抑制が期待できるが,既存部材内に蓄積された劣化因子による鉄筋腐食の進行を抑制することは困難である。

本研究の電気防食機能を有する炭素繊維シート補強は,炭素繊維シートに電気防食の陽極材としての機能を付与することで,鉄筋の腐食進行を防止するとともに,補強により部材の耐荷性能の回復あるいは向上を期待するものである。まず,導電性樹脂および炭素繊維シートに導電性樹脂を含浸したもの(以下 CFRP)について,その導電性,機械的性質を検討した。次に,本陽極システムを適用した RC 曲げ部材について,分極・復極特性,防食特性および曲げ耐荷特性を

検討した。さらに,防食電流通電後の載荷試験により,通電処理による影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 樹脂,CFRP の導電性,機械的性質および付着強さ

(1) 導電性樹脂の配合

導電性樹脂は,エポキシ樹脂に炭素繊維シートと同質のカーボンブラック(以下 CB)を導電性付与材として添加する方法で検討した。標準状態のコンクリートと同等の抵抗率($10^2 \sim 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$)を目標に,CB 添加量を 0.0, 3.3, 6.6, 8.0, 10.0%として抵抗率($\Omega \cdot \text{cm}$)を測定した。

(2) 導電性

導電性は,樹脂単独の硬化物と炭素繊維シート(200g/m^2 , $f_{CF}=3400 \text{N/mm}^2$, $E_{CF}=230 \text{kN/mm}^2$)に含浸させた CFRP について検討した。供試体は $20^B \times 130^L \times 1^t$ mm の板状で,20 雰囲気下で 7 日間養生した後,25V の電圧を印加し,絶縁抵抗計を用いて抵抗率を測定した。

(3) 機械的性質

樹脂単独の硬化物の圧縮強度,引張強度試験

*1 京都大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 博士(工学) (正会員)

*2 東洋建設(株) 総合技術研究所美浦研究所材料研究室 (正会員)

*3 日石三菱(株) 中央技術研究所複合材料グループ

*4 コニシ(株) 大阪研究所ボンド事業本部研究開発第四部

ならびに CFRP の引張強度試験を，JIS に規定されている方法に準拠して供試体を作製し，行った。試験は，いずれも供試体を 20 雰囲気下で 7 日間養生した後に行った。

(4) コンクリート供試体での導電性および付着強さ

JIS A 5304 に規定されているコンクリート平板(300^B × 300^L × 60^t mm)の上面に，(1)の導電性樹脂を用いた炭素繊維シートを接着，下面に対極として銅板を設置した。これを 20 雰囲気下で 7 日間養生した後，通電を行い抵抗値を測定した。また，同様の試験体にて一軸引張試験機を用いて付着強さの測定を行った。

2.2 RC はり供試体の通電および防食特性

(1) 供試体

供試体は，2-D13(SD295A)の単鉄筋はりで，かぶりを 20mm とした。防食回路を簡単にし，防食効果を明確に把握するとともに，主筋の状態と曲げ耐荷力あるいは曲げ補強効果の関係を明らかにするために，電気防食の対象は主筋のみとし，スターラップには防錆処理を施した。コンクリートは，水セメント比 60%の配合とし，過酷な腐食環境を想定し，NaCl=10kg/m³ を外割で混入した。作製した供試体を図-1 に示す。2.1 と同様の炭素繊維シートを，導電性プライマーおよび 2.1(1)の CB 添加率 8.0%の導電性樹脂(以下，高導電性樹脂)を用いて，供試体下面の支点間に軸方向 1 層接着した。

(2) 養生条件

供試体の養生は，脱型後 20 の室内で材齢 21 日まで湿布養生を行い，材齢 28 日で炭素繊維シ

ートを接着した。7 日間の 20 室内養生の後，乾湿繰返しの腐食促進養生に移行した。乾湿繰返しの環境条件は，高温多湿状態(温度 60 ，湿度 90%)3 日間，低温乾燥状態(温度 15 ，湿度 60%)4 日間のサイクルとした¹⁾。

(3) 測定方法および試験項目

鉄筋電位測定は，照合電極(飽和塩化銀電極)を用いて，供試体中央の鉄筋高さ位置の供試体両側面から表面に湿布を介して，2 本の主鉄筋を対象に行った。試験として，初期の通電電流量を設定するための分極試験と防食効果を確認するための復極試験を行った²⁾。復極試験は通電遮断後 24 時間の目標復極量を 100mV とし，満足しない場合には電流量を調整して再度通電することとした。また，比較のために，無補強無通電供試体の自然電位測定も行った。

さらに，材齢 140 日後に，腐食ひび割れ状況を観察するとともに，供試体から鉄筋をはつり出し，腐食量(質量減少率)測定³⁾および鉄筋の引張試験を行った。

2.3 曲げ補強部材の耐荷特性

(1) 供試体

曲げ試験には，2.2(1)と同様の供試体を用いた。ただし，樹脂の種類が補強部材の耐荷性状に与える影響を検討するために，炭素繊維シートの含浸・接着樹脂として高導電性樹脂の他に CB 添加率 5.0%で作業性を考慮したもの(以下，高施工性樹脂)と通常の耐震補強で用いられる樹脂(以下，普通樹脂)を使用した。また，通電処理が耐荷特性に与える影響を検討するために，2.2(2)の腐食促進環境で，高導電性樹脂を用い防食電流

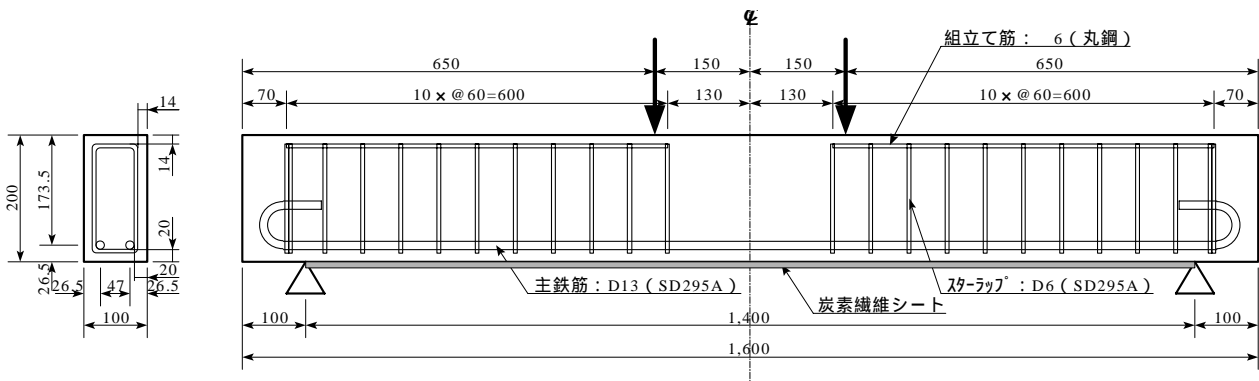


図-1 はり供試体の形状・寸法 (単位:mm)

表-1 供試体一覧

補強	樹脂	電防	载荷時期
無	-	-	健全期
有	普通	無	健全期
有	高施工性	無	健全期
有	高導電性	無	健全期
無	-	無	促進暴露後
有	高導電性	無	促進暴露後
有	高導電性	有	促進暴露後

を通电した供試体，曲げ補強のみで無通电の供試体，および無補強無通电の供試体を曲げ载荷試験した。供試体一覧を表-1 に示す。

(2) 载荷方法および測定項目

载荷は，スパン長 1400mm に対し曲げスパン 300mm の一方向対称 2 点载荷とし，降伏変位の奇数倍で 1 回の繰返しを行った。降伏変位 δ_y は，健全期の無補強供試体の荷重-変位曲線の屈曲点から定めた 5.22mm とした。終局は最大荷重以降，荷重が降伏荷重まで低下した点とした。荷重，スパン中央変位，両支点変位およびスパン中央の炭素繊維シートひずみを測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 樹脂，CFRP の導電性，機械的性質および付着強さ

(1) 導電性

CB 添加量と抵抗率の関係を図-2 に示す。樹脂および CFRP の抵抗率は，CB 添加量の増加にともない小さくなり，コンクリートの抵抗率($10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 程度)を満足するためには，樹脂単独の場合 8%程度，CFRP にした場合 6.6%程度の CB 添加量が必要である。一方，CB 添加量の増加にともない樹脂の粘度が増加し，作業性が低下したことから，作業性に関する改善策が必要であると考えられる。また，コンクリート平板に施工した場合の抵抗値は，樹脂の抵抗率に比例する傾向が見られた。

(2) 機械的性質および付着強さ

CB 添加量と樹脂の圧縮，引張強さおよび CFRP 引張強さの関係を図-3 に示す。圧縮，引張強さとともに CB 添加量の増加にともない低下す

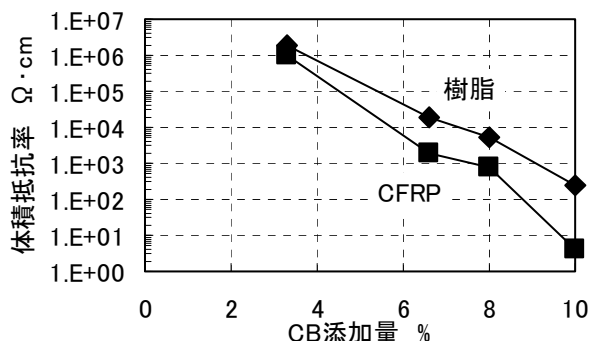


図-2 樹脂および CFRP の抵抗率

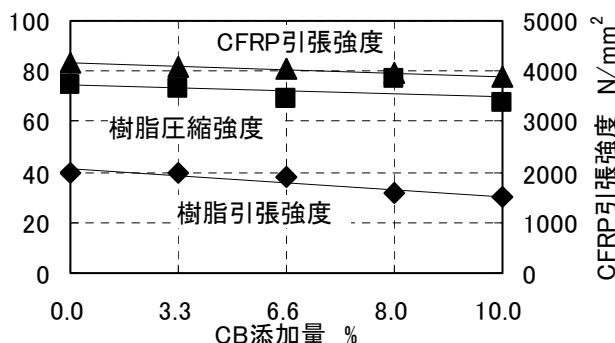


図-3 樹脂および CFRP の機械的性質

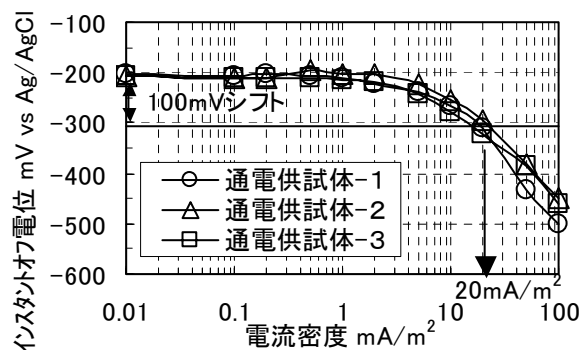


図-4 分極試験結果 (E-log I 関係)

る傾向が見られた。ただし，低下の程度は顕著でなく，いずれの添加量においても CFRP の引張強さは補強に要求される特性値を満足している。一方，付着強さでは，CB の有無，添加量による変化は見られず，いずれもコンクリート母材破壊を示した。

3.2 RC はり供試体の通电および防食特性

(1) 分極試験

分極試験の結果(E-log I 関係)を図-4 に示す。100 日間通电した後に载荷試験を行った供試体は表-1 中の 1 体であるが 現在も通电を継続し，100 日以上通电後に载荷を予定している供試体が 2 体ある。ただし，通电 100 日までは 3 体とも同一要因であることから，図-4,5,6 中では

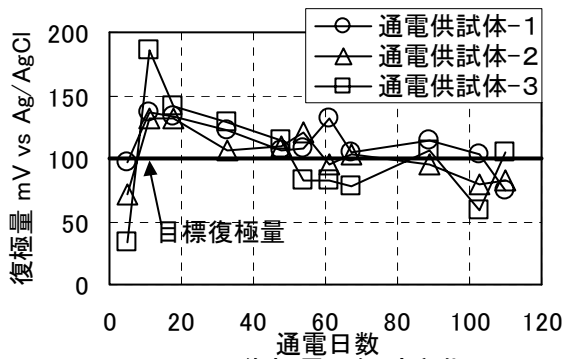


図-5 復極量の経時変化

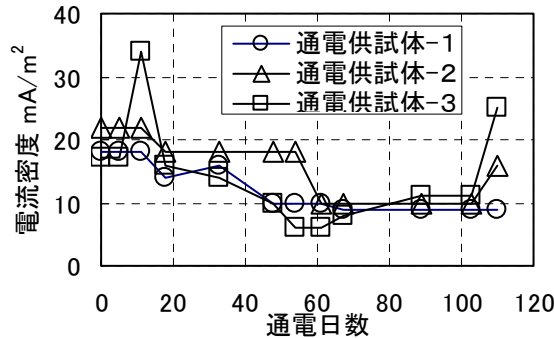


図-6 電流密度の経時変化

同一要因の3体(通電供試体-1,2,3)として表記した。電気防食を実施した3体の供試体は、いずれも 2mA/m^2 程度の電流密度でインスタントオフ電位が卑な方向に変化し始めた。また、 100mV の分極量を得るのに必要な電流密度は、いずれの供試体も約 20mA/m^2 となった。

(2) 復極試験

通電遮断後24時間の復極量の経時変化および電流密度の経時変化をそれぞれ図-5、図-6に示す。復極量は通電20日程度まで若干ばらつきが見られたが、通電調整することでおおむね目標とした復極量 100mV を満足することができた。しかし、所要の復極量を得るのに必要な電流密度は、材齢の経過にともない、通電日数100日程度までは小さくなる傾向を示したものの、その後は急激に大きくなる傾向を示した。また、一定の電流密度を保つために必要な電源電圧は、通電開始後から増加する傾向を示した。アノード側となるCFRP中の炭素に何らかの反応が生じ、導電性が低下しているものと推定されるが、詳しい原因については今後の課題である。

(3) 自然電位の経時変化

自然電位の経時変化を図-7に示す。通電開始

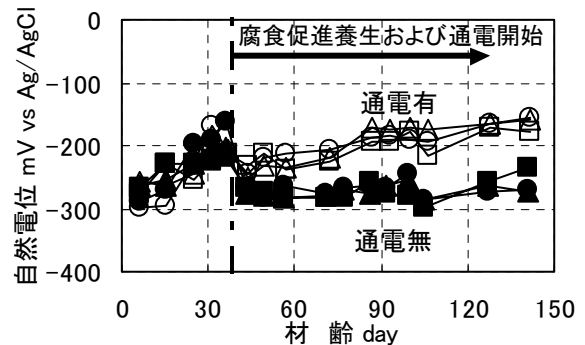


図-7 自然電位の経時変化

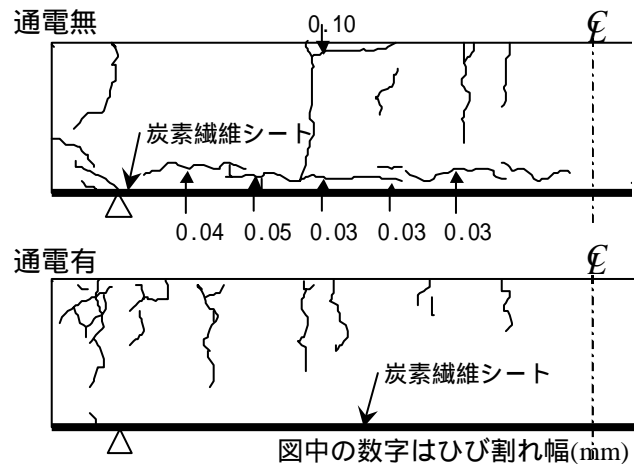


図-8 腐食ひび割れ状況

前の自然電位は、いずれの供試体も 100mV 程度貴な方向へ推移した。これはかぶりの含水率や強度などの変化によるものと考えられる。一方、通電直後からの自然電位は、通電の有無による違いが見られ、その差は材齢の経過にともなって大きくなっている。材齢140日では、通電供試体の自然電位が無補強無通電供試体に比べて 100mV 程度貴な方向にシフトしている。

(4) 腐食ひび割れ状況、鉄筋の腐食量および機械的性質

材齢140日後に観察した供試体側面の腐食ひび割れ状況を図-8に示す。いずれの供試体にも、せん断補強筋、組立筋の腐食に起因する腐食ひび割れが存在するが、通電無に見られた引張主筋の腐食に起因すると考えられる腐食ひび割れは、通電有には見られなかった。その後、通電有の供試体から主筋をはつり出したところ、練混ぜ時に混入した 10kg/m^3 の塩分の影響で初期の養生中に生じたと考えられる軽微な点錆が一部あったものの、顕著な腐食は観察できなかった。

表-2 鉄筋の腐食量および機械的性質

質量減少率 (%)	健全	2.1
降伏点 (N/mm ²)	365	365
引張強度 (N/mm ²)	524	545
伸び (%)	23.0	18.2

腐食鉄筋の強度の算定には、一様腐食を仮定し質量減少率を断面減少率として推定した断面積を用いた。

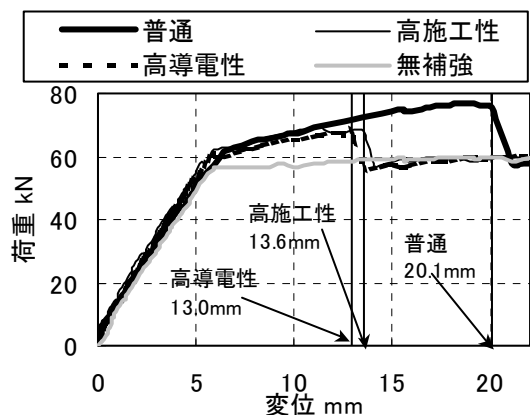


図-9 荷重-変位曲線

た。一方、通電無の鉄筋について行った腐食量および引張試験の結果を表-2 に示す。伸びに若干の低下は見られるが、2.1%の質量減少率では、機械的性質に顕著な低下は見られなかった。

3.3 曲げ補強部材の耐荷特性

(1) 荷重-変位曲線

シートはく離時付近までの荷重-変位曲線を図-9 に示す。図中にははく離時の変位をあわせて示した。部材降伏後の剛性に差は見られないものの、CB を添加した樹脂とプライマーを用いたものの方が、はく離時の変位が小さくなった。はく離は、載荷点直下の曲げひび割れの起点から支点に向かって生じたが、普通樹脂では、はく離したシートにかぶりが付着し、コンクリート中に破壊面を有するものであったのに対し、導電性を付与したものでは、導電性プライマーとコンクリートの界面で生じたと見られるものであった。3.1(2)の付着試験では、コンクリートの母材破壊であったことから、普通樹脂と同程度の付着強さを示したが、この曲げ試験で見られたピーリングをとまなうはく離に対しては、導電性を付与した樹脂およびプライマーの付着強さが、普通樹脂およびプライマーの組合せに

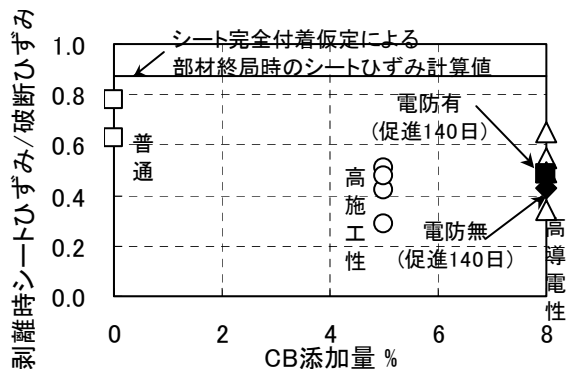


図-10 はく離時のシートひずみ

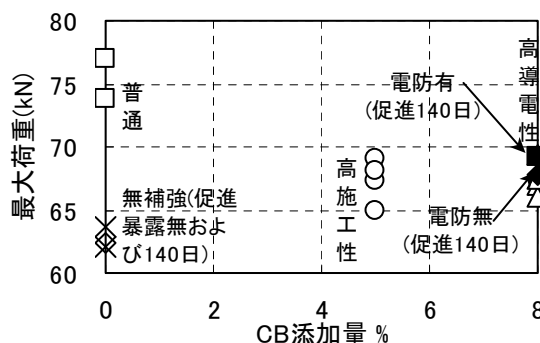


図-11 最大荷重

比べて小さくなったようである。樹脂、プライマーに添加したCB の分だけ、コンクリートとの接着面積が、普通樹脂とプライマーの組合せに比べて小さくなっていると考えられる。

(2) はく離時シートひずみおよび最大荷重

CB 添加量のはく離時におけるスパン中央のシートひずみに与える影響を図-10 に示す。図中には、平面保持およびシート完全接着を仮定した曲げモーメント-曲率解析において、部材終局時、すなわち上縁コンクリートが終局ひずみに達したときのシートひずみ計算値をあわせて示した。ひずみゲージの位置と曲げひび割れの状態により、ひずみの値にばらつきは見られるものの、導電性樹脂の方が、普通樹脂よりもはく離時のシートひずみが小さくなった。しかし、破断ひずみ(1.6%)の約 50%、またシート完全接着を仮定した部材終局時のシートひずみの約 58%まで、シートの引張強度を利用できた。一方、導電性樹脂では、CB 添加量 5%と 8%による影響は認められなかった。このことは、CB 添加量の異なるいずれの導電性樹脂においても、導電性プライマーには同一配合のものを用いているこ

とから、導電性樹脂ではなく、導電性プライマーの特性で、はく離時期が決定した可能性があることを示している。

次に、CB 添加量が最大荷重に与える影響を図-11 に示す。導電性を付与した樹脂の方が、はく離が早期に生じ、それに応じて最大荷重が小さくなる傾向を示している。ただし、いずれの曲げ補強供試体の最大荷重も無補強供試体より大きいことから、導電性樹脂、プライマーの接着性、コンクリートの表面処理方法あるいは定着方法の改善を念頭におけば、本陽極システムの曲げ補強への適用は可能である。

(3) 通電処理が耐荷特性に与える影響

材齢 140 日後の載荷試験により得られたはく離時シートひずみおよび最大荷重の結果を図-10、図-11 に合わせて示す。防食電流通電後のはく離時シートひずみ、最大荷重とも健全供試体とほぼ同程度の値を示した。100 日間の通電処理が炭素繊維シート曲げ補強部材の耐荷性能に関する耐久性能に与える影響はないといえる。

また、質量減少率 2.1%までの腐食では、無補強供試体の最大荷重の低下は見られなかった。文献 4)では、質量減少率約 2%で、鉄筋の機械的性質の低下とともに最大荷重が 7%程度低下する結果となっている。腐食形態や腐食ひび割れの状況の相違が影響していると考えられるが、このような腐食の状況にともなうばらつきを含めた評価は今後の検討課題であるといえる。なお、曲げ補強供試体では、シートのはく離で最大荷重が決定したことで、腐食の影響が見られなかったと考えられる。

4. 結論

本研究の範囲内で得られた主な結果をまとめて結論とする。

- (1) エポキシ樹脂に対し CB を添加することにより、樹脂に導電性を付与することができた。
- (2) 導電性樹脂を用いた CFRP の引張強度は、補強に要求される特性値を満足した。
- (3) 導電性樹脂を用いた CFRP 陽極システムを

RC はり供試体に適用することで、鉄筋への通電が可能であることがわかった。また、材齢 140 日までの鉄筋の防食効果を確認した。

(4) 通電日数 100 日以降、所要の復極量を得るために必要な電流密度および一定の電流密度を保つために必要な電源電圧が増加する傾向を示したことから、これらの原因を今後検討していく必要がある。

(5) 導電性樹脂を用いて曲げ補強した供試体では、従来の樹脂を用いたものよりシートのはく離が早期に生じた。ただし、導電性樹脂、プライマーの接着性、コンクリートの表面処理方法あるいは定着方法の改善を念頭におけば、本陽極システムの曲げ補強への適用は可能である。

(6) 100 日間の通電処理が曲げ補強部材の耐荷性能に与える影響は見られなかった。

謝辞

本研究の実施にあたり、京都大学大学院教授宮川豊章先生、同助教授服部篤史先生、住友大阪セメント(株)川俣孝治氏に多大なご協力、ご指導を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)，JCI-SC3，pp.9-15，1987.4.
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書，pp.117-126，1994.10.
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)，JCI-SC3，pp.1-4，1987.4.
- 4) Hattori, A. and Miyagawa, T.: Prediction of Degradation and Performance in RC Beams Subjected to Chloride Attack by Corrosion Monitoring, Proc. of Int'l Conference on Inspection, Appraisal, Repair and Maintenance of Buildings and Structures, Vol.2, pp.81-88, 2001.9.